

SIMULASI PERHITUNGAN REFLEKSI CAHAYA OLEH PERMUKAAN SEL SURYA SILIKON : STUDI PENGARUH PENAMBAHAN LAPISAN ANTI REFLEKSI ZINC OKSIDA (ZnO)

Andi Suhandi^{1*} and Firmanul Catur Wibowo²

¹⁾*Prodi Fisika FPMIPA Universitas Pendidikan Indonesia (UPI)*

Jl Dr. Setiabudhi 229 Bandung

²⁾*Prodi Pendidikan IPA Sekolah Pascasarjana (UPI)*

Jl. Dr. Setiabudhi 229 Bandung

Abstrak

Telah dilakukan simulasi perhitungan untuk mendapatkan gambaran pengaruh penambahan lapisan anti refleksi ZnO terhadap persen refleksi cahaya oleh permukaan sel surya Silikon. Proses perhitungan dilakukan dengan bantuan software Sigma Plot. Perhitungan menggunakan konsep-konsep dasar fisika terkait optika, diantaranya konsep refleksi dan transmisi gelombang cahaya ketika melewati bidang batas dua medium yang berbeda kerapatan optiknya, konsep polarisasi cahaya, dan konsep anti refleksi. Hasil simulasi perhitungan menunjukkan bahwa persen refleksi cahaya oleh permukaan sel surya silikon nilainya bergantung pada panjang gelombang cahaya datang (λ). Persen refleksi turun dari 38% ketika permukaan sel surya Silikon tidak dilapisi lapisan antirefleksi ZnO menjadi sekitar 15 % setelah permukaan sel surya silikon dilapisi lapisan ZnO dengan ketebalan sekitar 110 nm. Hasil lainnya menunjukkan bahwa persen refleksi cahaya oleh permukaan sel surya Silikon yang telah dilapisi lapisan anti refleksi ZnO nilainya bervariasi bergantung pada ketebalan lapisan anti refleksi yang digunakan. Dalam rentang data simulasi, ketika tebal lapisan anti refleksi ZnO ditingkatkan, persen refleksi cahaya oleh permukaan sel surya silikon nilainya turun, namun ketika ketebalan lapisan anti refleksi ditingkatkan lagi, ternyata persen refleksi cahaya oleh permukaan sel surya naik kembali. Keadaan ini menunjukkan adanya nilai ketebalan lapisan anti refleksi optimum yang menghasilkan persen refleksi cahaya oleh sel surya bernilai minimum. Penurunan persen refleksi cahaya oleh permukaan sel surya akan meningkatkan persen transmisi cahaya menuju lapisan aktif sel surya, yang pada akhirnya akan meningkatkan efisiensi konversi sel surya Silikon.

Kata kunci : simulasi, sel surya silikon, anti refleksi, ZnO

PENDAHULUAN

Sel surya yang saat ini beredar di pasaran dan banyak digunakan untuk berbagai keperluan sumber energi di Indonesia, sebagian besar terbuat dari bahan Silikon. Bahan ini menjadi pilihan karena harganya relatif murah, sehubungan ketersediannya di alam cukup melimpah. Kendala utama yang menyebabkan penggunaan sel surya sebagai sumber energi saat ini masih sangat terbatas dan kalah kompetitif dengan sumber energi lain, adalah masalah rendahnya efisiensi konversi yang dimilikinya. Rendahnya efisiensi konversi telah menyebabkan harga pemasangan panel surya menjadi jauh lebih mahal dibanding dengan

biaya untuk penggunaan sumber energi lain. Salah satu faktor yang menjadi penyebab rendahnya efisiensi konversi ini adalah tidak semua cahaya matahari yang jatuh ke permukaan sel surya silikon diserap dan dikonversi menjadi energi listrik, melainkan sebagian diantaranya dipantulkan kembali ke udara. Peristiwa pemantulan cahaya oleh permukaan sel surya terjadi akibat adanya perbedaan indeks bias diantara dua medium yang dilalui cahaya (udara-semikonduktor bahan pembuat sel surya) (San Vicente *et al*, 2001). Mekanisme fisis refleksi cahaya dapat dijelaskan dengan konsep penyerapan dan radiasi kembali (*reradiation*) cahaya oleh atom-atom penyusun

bahan (material) pembuat sel surya. Cahaya yang datang pada material akan diserap dan selanjutnya akan diradiasikan kembali ke lingkungan oleh atom-atom tersebut. Cahaya radiasi ini menyebar ke segala arah dengan frekuensi yang sama dan akan berinterferensi konstruktif untuk menghasilkan cahaya refleksi (Tipler, 1992).

Refleksi (R) pada bidang batas medium udara dengan material semikonduktor untuk kondisi sudut datang normal (0°) dinyatakan oleh persamaan :

$$R = \left(\frac{n_{\text{sel surya}} - n_{\text{udara}}}{n_{\text{sel surya}} + n_{\text{udara}}} \right)^2 \quad (1)$$

Disini n menyatakan indeks bias. Apabila Persamaan (1) digunakan untuk menghitung persen refleksi oleh permukaan sel surya dari bahan silikon ($n_{\text{silikon}} = 3,85$) yang berada dalam medium medium udara ($n_{\text{udara}} = 1$), maka akan dihasilkan hasil perhitungan persen refleksi sekitar 35%. Refleksi yang tinggi ini tentu akan membatasi efisiensi konversi sel surya tersebut, sehingga diperlukan lapisan anti refleksi agar efisiensinya dapat ditingkatkan (San Vicente *et al*, 2001).

Salah satu cara untuk mengatasi persoalan besarnya persen refleksi ini adalah penggunaan lapisan anti pantul, dengan cara melapiskan material lain yang sifatnya transparan dan kompatibel dalam hal sifat optiknya dengan sel surya yang ditinjau. Khaldun dkk menyatakan bahwa lapisan anti refleksi dapat meningkatkan unjuk kerja sel surya dengan cara meningkatkan intensitas cahaya yang terperangkap dalam lapisan aktif sel surya (Khaldun *et al*, 2012).

Lapisan anti refleksi yang biasa digunakan industri sel surya berbasis Silikon adalah titanium oksida (TiO_2). TiO_2 dipilih karena harganya murah dan teknik pelapisannya sederhana yaitu menggunakan teknik *screen printing* sehingga mudah diterapkan untuk industri (Chen, 2001) (Hovel, 1978) (Sopori, & Pryor, 1983). Sayangnya bahan ini bersifat toksik. Seng oksida (ZnO) berpotensi sebagai lapisan anti refleksi pada sel surya Silikon karena memiliki indeks bias sekitar 2, dan *bandgap* yang besar yaitu 3,3 - 3,7 eV, bersifat transparan pada daerah cahaya tampak serta memiliki sifat adhesi dan kekerasan yang baik. Kelebihan anti refleksi berbahan dasar ZnO dibanding TiO_2 yaitu sifat toksikitasnya lebih

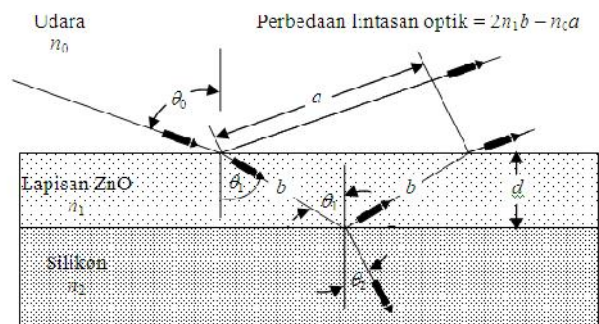
rendah, mudah diperoleh di pasaran dengan harga yang relatif murah, dan dapat dilapiskan dengan teknik pelapisan yang sederhana dan murah (Aslan *et al*, 2004) (Mizuta, 2006).

Paper ini memaparkan mekanisme, proses dan hasil simulasi perhitungan persen refleksi cahaya oleh permukaan sel surya silikon yang diberi lapisan anti refleksi ZnO dengan ketebalan yang bervariasi.

Lapisan Tunggal Antirefleksi

Pada prinsipnya lapisan anti refleksi digunakan untuk mengurangi atau kalau mungkin menghilangkan sama sekali gelombang cahaya yang direfleksi oleh permukaan sel surya sehingga energi cahaya yang jatuh di permukaan sel surya dapat ditransmisikan dan diserap sebanyak-banyaknya oleh sel surya untuk dikonversi menjadi energi listrik. Pengkajian tentang pengurangan refleksi cahaya oleh lapisan anti pantul dapat dilakukan dengan menerapkan prinsip interferensi destruktif.

Gambar 1 menunjukkan mekanisme refleksi yang terjadi pada permukaan sel surya apabila di atas permukaannya diberi lapisan anti pantul (anti refleksi) tunggal (Melles, 2009).



Gambar 1. Mekanisme refleksi pada permukaan sel surya yang diberi lapisan anti refleksi.

Jika diasumsikan bahwa pada permukaan lapisan anti refleksi terjadi suatu refleksi ekstrim orde pertama untuk beberapa panjang gelombang λ_d dan sudut datang n_{0d} pada medium luar. Lapisan dapat dispesifikasi secara lengkap apabila n_{1d} dan λ_d diketahui. Nilai ekstrim akan minimum jika n_2 lebih kecil dari n_3 dan maksimum jika n_2 lebih dari n_3 . Apabila sudut datang pada medium luar n_{0d} , maka sudut bias dalam lapisan anti refleksi dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$\theta_{1d} = \arcsin\left(\frac{n_0(\lambda_d)\sin\theta_{0d}}{n_1(\lambda_d)}\right) \quad (2)$$

Jika θ_0 berkurang dari θ_{0d} menuju nol maka refleksi ekstrim bergeser dari panjang gelombang λ_d menuju λ_n dengan subskrip n menunjukkan sudut normal. Panjang gelombang normal diberikan oleh persamaan berikut :

$$\lambda_n = \left(\frac{n_1(\lambda_n)}{n_1(\lambda_d)}\right)\left(\frac{\lambda_d}{\cos\theta_{1d}}\right) \quad (3)$$

Sudut bias di dalam lapisan anti refleksi (θ_1) dan sudut bias di dalam lapisan sel surya (θ_2) untuk sembarang sudut datang θ_0 dan sembarang panjang gelombang λ dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{n_0(\lambda)\sin\theta_0}{n_1(\lambda)}\right) \quad \text{dan} \quad \theta_2 = \arcsin\left(\frac{n_0(\lambda)\sin\theta_0}{n_2(\lambda)}\right) \quad (4)$$

dengan $n_0(\lambda)$, $n_1(\lambda)$ dan $n_2(\lambda)$ berturut-turut menyatakan indeks bias medium (udara), indeks bias lapisan anti refleksi dan indeks bias lapisan sel surya yang bergantung panjang gelombang λ .

Polarisasi cahaya dapat terjadi pada saat cahaya tersebut direfleksikan maupun ditransmisikan. Koefisien refleksi Fresnel pada batas medium 0 dan 1 (udara-lapisan anti refleksi) dan batas medium 1 dan 2 (lapisan anti refleksi-lapisan sel surya) untuk cahaya terpolarisasi jenis-p dan untuk cahaya terpolarisasi jenis-s dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$r_{01p} = \frac{n_1 \cos\theta_0 - n_0 \cos\theta_1}{n_1 \cos\theta_0 + n_0 \cos\theta_1} \quad (5)$$

$$r_{12p} = \frac{n_2 \cos\theta_1 - n_1 \cos\theta_2}{n_2 \cos\theta_1 + n_1 \cos\theta_2} \quad (6)$$

$$r_{01s} = \frac{n_0 \cos\theta_0 - n_1 \cos\theta_1}{n_0 \cos\theta_0 + n_1 \cos\theta_1} \quad (7)$$

$$r_{12s} = \frac{n_1 \cos\theta_1 - n_2 \cos\theta_2}{n_1 \cos\theta_1 + n_2 \cos\theta_2} \quad (8)$$

Cahaya terpolarisasi jenis-p merupakan osilasi gelombang yang sejajar (paralel) terhadap bidang cahaya terpolarisasi sedangkan cahaya terpolarisasi jenis-s merupakan osilasi gelombang tegak lurus terhadap bidang cahaya terpolarisasi (Hariyati, 1998).

Refleksi gelombang cahaya terpolarisasi jenis-p dan jenis-s pada bidang batas dua medium untuk permukaan yang diberi lapisan antirefleksi tunggal dinyatakan dengan persamaan :

$$R_p = \frac{r_{01p}^2 + r_{12p}^2 + 2r_{01p}r_{12p}\cos(2S)}{1 + r_{01p}^2r_{12p}^2 + 2r_{01p}r_{12p}\cos(2S)} \quad (9)$$

$$R_s = \frac{r_{01s}^2 + r_{12s}^2 + 2r_{01s}r_{12s}\cos(2S)}{1 + r_{01s}^2r_{12s}^2 + 2r_{01s}r_{12s}\cos(2S)} \quad (10)$$

Dengan S menyatakan beda fase antara gelombang yang direfleksikan oleh permukaan lapisan anti refleksi dan gelombang yang direfleksikan oleh permukaan sel surya, yang memenuhi persamaan :

$$S = \frac{2f}{\lambda} n_1(\lambda) d \cos\theta_1 \quad (11)$$

Dengan d menyatakan tebal fisis lapisan anti refleksi. Refleksi rata-rata untuk sel surya yang diberi lapisan anti refleksi dinyatakan dengan persamaan :

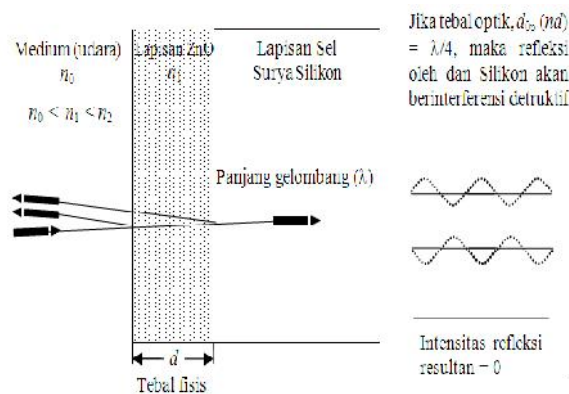
$$\bar{R} = \frac{1}{2}(R_p + R_s) \quad (12)$$

Gambar 2 memperlihatkan skema lapisan tunggal antirefleksi untuk sudut datang normal. Cahaya refleksi oleh permukaan anti refleksi dan permukaan sel surya, keduanya mengalami perubahan fase 180° karena cahaya berjalan dari medium berindeks bias rendah menuju medium yang berindeks bias tinggi. Oleh karena itu perbedaan fase diantara dua cahaya refleksi tersebut semata-mata ditentukan oleh perbedaan lintasan optik $2dn_1$. Interferensi destruktif terjadi apabila kedua sinar refleksi memiliki panjang

lintasan yang sama dan memiliki beda fase 180° . Perubahan fase sebesar 180° diperoleh apabila perbedaan lintasan optik diantara dua sinar refleksi tersebut merupakan kelipatan bilangan ganjil dari setengah panjang gelombang ($2dn_1 = N\lambda/2$, dengan $N = 1, 3, 5 \dots$). Tebal fisis lapisan anti refleksi tunggal (d) biasanya ditentukan dengan mengambil $N = 1$ atau,

$$d = \frac{\lambda}{4n_1} \quad (13)$$

dengan λ menyatakan panjang gelombang yang hendak diminimumkan refleksinya.



Gambar 2. Skema lapisan tunggal anti refleksi untuk sudut datang normal.

Jika mekanisme polarisasi diabaikan, refleksi cahaya oleh lapisan tunggal anti refleksi pada kondisi sudut datang normal menjadi :

$$R = \left(\frac{n_0 n_2 - n_1^2}{n_0 n_2 + n_1^2} \right)^2 \quad (14)$$

Sehingga berdasarkan Persamaan (14), refleksi sama dengan nol diperoleh apabila

$$n_1 = \sqrt{n_0 n_2} \quad (15)$$

dengan n_0 menyatakan indeks bias medium udara, n_1 menyatakan indeks bias lapisan tunggal

Material untuk lapisan tunggal antirefleksi sel surya harus dipilih yang kompatibel dengan sel surya yang digunakan, dalam hal ini harus memenuhi Persamaan (13) dan (15). Salah satu

syarat yang harus dipenuhi untuk anti refleksi sel surya silikon yang memiliki indeks bias ($n_{Si} = 3,85$) adalah material yang memiliki indeks bias sekitar 2. Selain itu material tersebut juga harus memiliki karakteristik transmitansi yang tinggi. Pada Tabel 1 ditunjukkan beberapa material yang memenuhi syarat sebagai lapisan antirefleksi sel surya silikon (Cheek *et al*, 1979) (Elam *et al*, 2002) (Fokkink *et al*, 2001) (Kavakli dan Kantarli, 2002) (Lim *et al*, 2002) (Sopori, 2005).

Tabel 1. Indeks bias dari beberapa material antirefleksi

Material	Indeks bias
Ta ₂ O ₅	2,10
Si ₃ N ₄	2,02
MgF ₂	1,38
SiO ₂	1,46
SiO	1,85
CeO ₂	2,20
ZnS	2,35
InSnO ₂ (ITO)	1,90
TiO ₂	2,88
ZnO	2,01

Material yang umum digunakan sebagai lapisan antirefleksi dalam industri sel surya yang menggunakan substrat silikon kristal diantaranya titan oksida (TiO₂) dan silikon nitrida (SiN_x). TiO₂ dipilih karena murah dan teknik pelapisannya menggunakan teknik *screen printing* dan *Atmosphere Pressure Chemical Vapor Deposition* (APCVD) yang mudah diimplementasikan ke industri (Chen, 2001) (Hovel, 1978) (Sopori, & Pryor, 1983). Lapisan antirefleksi TiO₂ mampu meningkatkan efisiensi sel surya kurang dari 2% (Vallejo *et al*, 2005). Namun, pelapisan antirefleksi TiO₂ dengan teknik *screen printing* membutuhkan pasta TiO₂ yang menggunakan bahan baku yang sifatnya racun.

SiN_x juga digunakan oleh hampir semua industri besar produsen sel surya di dunia sebagai lapisan anti refleksi yang dilapiskan dengan metoda *Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition* (PECVD). Keunggulan SiN_x adalah kompatibel dengan silikon sehingga menghasilkan refleksi di bawah 3% dan dapat bertindak sebagai *pasivasi* (menghalangi terjadinya rekombinasi elektron-hole pada permukaan) sehingga dapat meningkatkan efisiensi sel lebih besar dari 3% (Crotty *et al*,

1987). Namun teknik CVD membutuhkan peralatan yang mahal, oleh karena itu hanya digunakan oleh industri-industri besar.

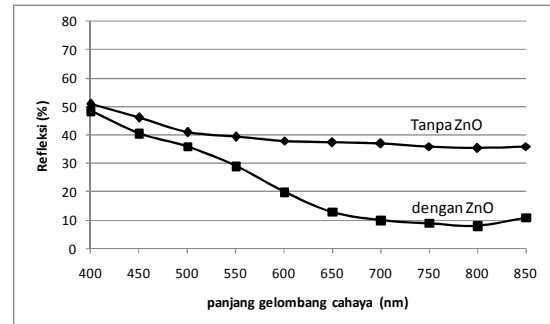
ZnO merupakan semikonduktor tipe-*n* dengan energi *gap* yang lebar yaitu sekitar 3,2 - 3,37 eV, berkonduktivitas listrik baik, memiliki kekerasan dan adhesi yang baik terhadap substrat, transmitansinya tinggi serta memiliki refleksi yang tinggi pada daerah infra merah (IR). Indeks bias ZnO mendekati 2 yang merupakan syarat untuk indeks bias lapisan antirefleksi sel surya silikon kristal (Aslan *et al*, 2001) (Vino *et al*, 2009).

Dalam bentuk lapisan tipis ZnO dapat dibuat dengan teknik deposisi yang sederhana dan murah seperti teknik *spin coating*. Telah melaporkan keberhasilannya mendeposisi lapisan tipis ZnO dengan teknik *spin coating* yang mempunyai struktur kekristalan heksagonal dengan orientasi pada bidang (100), (002) dan (101) (Aslan *et al*, 2001) (Aslan *et al*, 2001). Kemungkinan deposisi dengan teknik yang murah tidak akan menambah beban ekonomi yang berarti dari penggunaan sel surya silikon.

HASIL DAN PEMBAHASAN

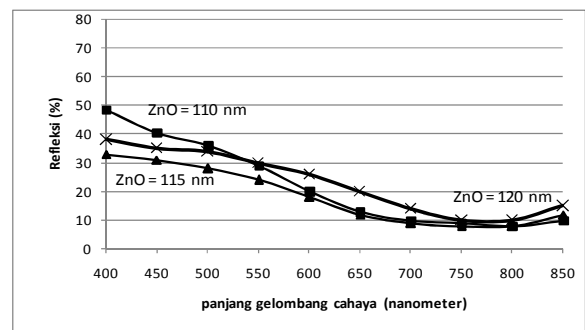
Gambar 3. menunjukkan grafik persen refleksi sebagai fungsi panjang gelombang cahaya oleh permukaan sel surya silikon dengan dan tanpa lapisan anti refleksi ZnO. Tampak bahwa persen refleksi cahaya merupakan fungsi panjang gelombang cahaya, hal ini dapat difahami karena memang indeks bias suatu medium merupakan fungsi panjang gelombang cahaya. Sebagaimana telah dipaparkan di atas, perbedaan indeks bias cahaya antar dua medium merupakan faktor kunci yang menentukan persen refleksi yang akan terjadi pada permukaan sel surya silikon. Dapat dilihat pula bahwa dengan penambahan lapisan anti refleksi pada permukaan silikon dengan ketebalan tertentu dapat mereduksi persen refleksi yang terjadi secara signifikan, terutama untuk panjang gelombang besar ($\lambda > 550$ nm). Seperti sebelumnya hal ini juga terkait dengan perubahan perbedaan indeks bias cahaya antara dua medium, asalnya medium udara (indeks bias 1) - silikon (indeks bias 3,85) menjadi dapat medium ZnO (indeks bias 2) – silikon (indeks bias 3,85). Ketika ada lapisan anti refleksi ZnO maka cahaya yang datang dari udara akan dibiaskan mendekati garis normal ketika masuk bidang batas udara-ZnO, untuk kemudian

dibiaskan kembali ketika masuk bidang batas ZnO-Silikon, dengan demikian maka peluang cahaya yang dipantulkan akan semakin kecil sebaliknya peluang cahaya ditransmisikan akan lebih besar.



Gambar 3. Hasil simulasi perhitungan persen refleksi cahaya oleh permukaan Silikon Dengan dan tanpa lapisan anti refleksi ZnO.

Gambar 4 menunjukkan grafik persen refleksi oleh permukaan sel surya silikon yang dilapisi lapisan anti refleksi ZnO terhadap panjang gelombang cahaya untuk ketebalan lapisan ZnO yang bervariasi. Tampak bahwa variasi ketebalan lapisan anti refleksi ZnO menghasilkan persen refleksi yang berbeda. Dalam rentang simulasi, ketika ketebalan lapisan anti refleksi ZnO ditingkatkan dari 110 nm menjadi 115 nm, persen refleksi cahaya menjadi menurun, tetapi ketika ketebalan lapisan anti refleksi ZnO ditingkatkan kembali dari 115 nm menjadi 120 nm, ternyata persen refleksinya meningkat lagi. Hal ini menunjukkan ada ketebalan lapisan anti refleksi ZnO yang optimal yang akan menghasilkan persen refleksi yang minimal ketika dipasang pada sel surya silikon.



Gambar 4. Hasil simulasi perhitungan persen refleksi cahaya oleh permukaan Silikon sebagai fungsi ketebalan lapisan anti refleksi ZnO

Ketebalan lapisan anti refleksi mengendalikan panjang lintasan optik cahaya yang menembusnya, sehingga akan memainkan peran dalam proses pengaturan jenis interferensi yang terjadi.

KESIMPULAN

Dari hasil simulasi perhitungan persen refleksi cahaya oleh permukaan sel surya silikon yang diberi lapisan anti refleksi ZnO dapat disimpulkan bahwa persen refleksi cahaya oleh permukaan sel surya nilainya bergantung pada panjang gelombang cahaya datang dan ketebalan lapisan anti refleksi yang digunakan. Terdapat suatu ketebalan lapisan anti refleksi optimum yang menghasilkan persen refleksi cahaya oleh permukaan sel surya silikon bernilai minimum. Untuk itu perlu dilakukan simulasi yang lebih *smoot* lagi untuk optimasi ketebalan lapisan anti refleksi ZnO.

REFERENSI

- Aslan, M.H., Oral, A.Y., Mensur, E., Gul, A., dan Basaran, E. 2004. "Preparation of c-Axis-Oriented Zinc-Oxide Thin Films and the Study of Their Microstructure and Optical Properties", *Solar Energy Material and Solar Cells*. 82, 543-552.
- Cheek, G. et.al. 1979. "Antireflection Properties of Indium Thin Oxide (ITO) for Photovoltaics Applications", *Appl. Phys. Let.* 35, 495-497.
- Chen, D. 2001. "Anti Reflection (AR) Coatings Made by Sol-gel Process : A Review", *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 68, 313-336.
- Crotty, G. et.al. 1987. "Front Surface Passivation of Silicon Solar Cells with Antireflection Coating", *Appl. Phys.* 61, 3077- 3078.
- Elam, J.W. et.al. 2002. "ZnO/Al₂O₃ Nanolaminate Fabricated by Atomic Layer Deposition: Growth and Surface Roughness Measurment", *Thin Solid Films*. 414, 43-55.
- Fokkink, Soutar, B., Xianting, Z., Nee, T.S., dan Wu, L. 2001. "Sol-gel Antireflective Coatings", *SIMTech Technical Report*, (PT/01/002/ST). Singapore.
- Hariyadi 1998. "Ellipsometer Sederhana". *Elektro Indonesia*. 14, 1-4.
- Hovel, H.J. 1978. "TiO₂ Antireflection Coatings by a Low Temperature Spray Process", *Electrochem Soc.: Solid-State Science and Technology*. 125, 983-985.
- Kavakli, I.G. dan Kantarli, K. 2002. "Single and Double-Layer Antireflection Coatings on Silicon", *Turk. J. Phys.* 26, 349-354.
- Khalidun, Salman A., Khalid Omar, Z. Hasan, 2012. "Effective Conversion Efficiency Enhancement of Solar Cell Using ZnO/PS Anti Reflection Coating Layers", *Solar Energy* 86, 541-547.
- Lim, D.G., Jang D. dan Yi Junsin 2002. "A Novel Multicrystalline Silicon Solar Cells Using Grain Boundary Etching Treatment and Transparent Conducting Oxide", *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 72, 571-578.
- Melles Griot. Single-Layer Antireflection Coating. Tersedia pada: http://www.mellesgriot.com/products/optics/oc_2_2.htm. Diakses pada tanggal 1 September 2009.
- Mizuta, T., Ishibasi, T, Minemoto, T, Takakura, H., dan Hamakawa, Y. 2006. "Chemical Deposition of Zinc Oxide Thin Film on Silicon Substrat", *Science Direct, Thin Solid Films*. 515, 2458-2463.
- San Vicente, G., Morales, A. dan Gutierrez, M.T. 2001. "Preparation and Characterization of Sol-gel TiO₂ Antireflective Coatings for Silicon", *Thin Solid Films*. 391, 133-137.
- Sopori, B.L. dan Pryor, R.A. 1983. "Design of Antireflection by Coating for Textured Silicon Solar Cells", *Solar Cells*. 8, 249-261.
- Sopori, B. 2005. "Dielectric Films for Silicon Solar Cells Applications", *Electronic Materials*. 5, 1-7.

- Tipler, P.A. 1992. Fisika untuk Sains dan Teknik. Jilid 2. Edisi ketiga Jakarta: Erlangga.
- Vallejo, B. et. al. 2005. "Characterization of TiO_2 Deposited on Textured Silikon Wafer by Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition", Solar Energy Materials and Solar Cells. 86, 299-308.
- Vinodkumar, R., Lethy, K.J., Beena, D., Satyanarayana, M., Jayasree, R.S., Ganesan, V., Nayar, V.U., dan Pillai, V.P.M. 2009. "Effect of Thermal Annealing on the Structural dan Optical Properties of Nanostructured Zinc Oxide Thin Films Prepared by Pulsed Laser Ablation", Solar Energy Materials and Solar Cells. 93, 74-78.